

# 无粘结预应力混凝土筒仓设计

郭廷哲 邵一谋

**摘要** 本文结合新规范《混凝土结构设计规范》GBJ10—89,对预应力筒仓的设计方法问题,进行了一些初步探讨,并从设计角度出发,整理成文,供设计参考。

**关键词** 筒仓 混凝土 预应力

近几年来,后张无粘结预应力混凝土在圆筒煤仓设计中应用,取得了较好的技术经济效果,使圆筒仓的直径由以往一般的18~21m,逐步增加到30~40m,甚至有向50m方向发展的可能。

## 一、预应力混凝土筒仓设计的一般原则

1. 一般仅对环向施加预应力。采用后张无粘结预应力混凝土结构,由预应力筋和非预应力筋共同承担。

2. 预应力混凝土筒仓结构的裂缝控制等级可按2级,混凝土拉应力限制系数 $\alpha_{ct}=0.5$ ;按荷载短期效应组合进行计算时,构件受拉边缘混凝土允许产生拉应力,但其拉应力不应超过 $0.5f_{tk}$ 。

3. 采用后张无粘结预应力混凝土结构,其预应力筋的张拉控制应力 $\sigma_{con}$ ,可按式计算。

$$\sigma_{con}=0.7f_{pk} \quad (1)$$

4. 预应力筒仓的最大仓壁厚度 $t$ (mm),可按式计算(但不宜小于200mm):

$$t=d_n/100+50 \quad (2)$$

式中  $d_n$ ——筒仓内径(mm)。

当仓壁最大厚度超过400mm时,可考虑将仓体做成变截面的。厚度差不宜大于100mm,变截面位置可在 $2H_n/3$ 处,内表面取平。

5. 预应力筒仓的非预应力筋的配筋率,水平环向不小于0.4%,宜采用Ⅱ级钢筋,直径不小于 $\Phi 10$ ,间距不大于200mm,也不小于70mm。

垂直钢筋:仓壁应配置双层钢筋,以承受由于筒仓局部装料或预加应力时引起的弯矩,此外钢筋的数量也应能满足温度应力下仓壁所受荷载的要求,其钢筋直径不小于 $\Phi 12$ ,其它按《钢筋混凝土

土筒仓设计规范》有关规定进行。

6. 预应力筋采用无粘结钢丝束,其局部偏差摩擦系数 $K$ 和筋与孔道壁之间摩擦系数 $\mu$ 值,应按有关规定取值。必要时可按下列数值参考选用:即直线段的 $K=0.0015$ ;曲线段的 $K=0.0035$ ;  $\mu=0.10$ 。

7. 预应力混凝土筒仓的混凝土强度等级的采用,一般不低于C30。仓壁混凝土的保护层厚度,对预应力钢丝束不应小于40mm;非预应力筋不应小于25mm。

8. 预应力筋的张拉锚固点,采用沿圆周均匀分布的原则,力求钢丝束作用于圆形仓壁而引起的压应力尽可能均匀。在每一壁柱的同一截面上锚固筋的数量不得超过总数的1/2,即锚固点要间隔设置。

9. 预应力钢丝束的间距,应满足张拉端锚固面局部承压计算的要求,不小于200mm,最大不应超过3倍仓壁厚度,也不得大于1000mm。

10. 预应力筒仓采用扶壁柱形式锚固预应力筋时,其柱的外形尺寸满足局部承压面积计算要求和端部张拉操作行动的方便。同时还满足锚具喇叭管埋设抗剪切、抗壁裂等受力要求,其肋高不小于350mm,宽度不小于1000mm。联系筋的配筋率不小于0.5%。Ⅱ级钢筋,直径不小于 $\Phi 14$ 。

11. 仓壁洞口处理:当预应力钢丝束的布置遇到洞口时,在可能条件下,将这一部分钢丝束按喇叭状扩大,紧靠洞口绕过,喇叭口长度从洞口中中心算起,不大于仓的直径,也不得小于6倍的洞高。要考虑由于满载和空载引起的洞口应力集中以及钢丝束叉开所产生的水平分力和垂直分力的

影响。

洞口两侧每侧配置的垂直钢筋面积,不小于0.5倍洞口切断的垂直钢筋面积,也不得小于按垂直弯矩或垂直力计算时所得钢筋面积(即由于钢丝束叉开引起的)。

12. 预应力筒仓的预应力范围,一般从仓底到仓顶圈梁以下范围以内,均宜采用预应力,由于筒仓结构贮料压力作用的特点,荷载基本上为三角形沿仓高分布,形成上小下大,因此,在仓上部一定范围内,也可适当采用变截面混凝土仓壁结构,此时在变化点处应设置暗梁以协调其应力变化。暗梁宽度与仓壁厚度相同,高不小于1.5倍仓壁厚度,配筋按轴拉构件计算。纵向受力钢筋配筋率不小于0.4%。

13. 锚具垫板下喇叭管中的空间用纯水泥砂浆灌实,以保护预应力筋。灌浆用水泥不低于525号,水灰比为0.4~0.45,水泥浆标号不低于C30级。施加预应力工艺完成后,应将外露的预应力钢丝或钢绞线除油污,然后在离夹片100mm以外散开弯折,和锚具一道用C40级混凝土浇灌保护。

## 二、预应力混凝土筒仓的计算

### 1. 筒仓仓壁截面的配筋计算

筒仓仓壁在贮料水平压力荷载作用下,为轴心受拉构件,其正截面受拉承载力,应按下列公式计算:

$$N \leq f_y A_s + f_{py} A_p \quad (3)$$

式中  $f_y$ 、 $f_{py}$ —分别为非预应力筋和预应力筋的抗拉设计值(N/mm<sup>2</sup>);

$A_s$ 、 $A_p$ —分别为非预应力筋和预应力筋的截面面积(N/mm<sup>2</sup>)。

从公式(3),可以看出仓壁的轴向拉力N,将由非预应力筋和预应力筋共同承拉。

假定非预应力筋承担的环拉力为 $N_1$ ,  $N_1 = \eta_b N$ ,

则预应力钢筋承担的环拉力为 $N_2$ ,  $N_2 = N - N_1 = N(1 - \eta_b)$ 。

#### (1) 非预应力和钢筋的配筋计算

$$N_1 = A_s f_y;$$

$$\text{所以 } A_s = \frac{N_1}{f_y} = \frac{N \eta_b}{f_y};$$

$$\text{配筋率 } \rho_s = A_s / A$$

全部环拉力N由非预应力钢筋和预应力钢筋共同承担,为充分发挥材料强度的能力,使其能很好的协同工作,并满足强度计算和构件抗裂验算,一般可采用两种钢筋抗拉设计强度的比值。

$$\text{即 } \eta_b = \frac{f_y}{f_{py}}$$

将 $\eta_b$ 值代入 $A_s$ 算式中则

$$A_s = \frac{N \frac{f_y}{f_{py}}}{f_y} = \frac{N}{f_{py}} \quad (4)$$

将 $A_s$ 代入 $\delta_s$ 算式中,并令 $A = t \times 10^3$ 得

$$\rho_s = \frac{N}{A f_{py}} = \frac{N}{t f_{py} \times 10^3} = \frac{N}{10 t f_{py}} (\%) \quad (5)$$

在预知非预应力筋的配筋率的情况下,即可按(5)计算。

#### (2) 预应力钢筋的配筋计算

全部环拉力由二者共同承担,从总的环拉力减去非预应力筋承担部分,其余即为预应力钢筋承担部分。

$$N_2 = N(1 - \eta_b)$$

$$\eta_b = \frac{f_y}{f_{py}}$$

$$A_p = \frac{N_2}{f_{py}} = \frac{N(1 - \eta_b)}{f_{py}} \quad (6)$$

$$\text{配筋率 } \rho_p = \frac{A_p}{A} = \frac{A_p \times 10^3}{A} (\%) \quad (7)$$

$$\text{总的配筋率 } \rho = \rho_s + \rho_p \quad (8)$$

#### 2. 预应力筒仓仓壁的抗裂验算

根据筒仓结构的受力特点,仅考虑在荷载短期效应组合下,按一般要求不出现裂缝的构件,其正截面抗裂验算,应符合下列规定,即:

$$\sigma_{sc} - \sigma_{pc} \leq \alpha_{ct} \nu f_{tk} \quad (9)$$

因考虑到非预应力钢筋与预应力钢筋共同承担总的环拉力。因此,应从 $\sigma_{sc} - \sigma_{pc}$ 中再减去非预应力钢筋承担的拉应力 $\sigma_s$ ,取受拉区混凝土塑性影响系数 $\nu = 1.0$ ;混凝土拉应力限制系数 $\alpha_{ct} = 0.5$ 。将以上各值代入(9)式中

$$\sigma_{sc} - \sigma_{pc} - \sigma_s \leq 0.5 f_{tk} \quad (10)$$

式中  $\sigma_{sc}$ —荷载的短期效应组合下抗裂验算边缘

的混凝土法向应力,对筒仓  $\sigma_{sc} = \frac{N_s}{A_n}$  (N/mm<sup>2</sup>),  $N_s = N / \gamma_Q$  (N/m);

$\sigma_{pc}$ —扣除全部预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力;

$\sigma_s$ —扣除全部预应力损失后在抗裂验算边缘混凝土的预压应力;

$$\sigma_{pc} = \frac{A_p(\sigma_{con} - \sigma_s)}{A_0} \quad (\text{N/mm}^2);$$

$\sigma_s$ —预应力总损失值(N/mm<sup>2</sup>),包括 $\sigma_{L1}$ 、 $\sigma_{L2}$ 、 $\sigma_{L4}$ 、 $\sigma_{L5}$ 四个分项,具体计算可按《砼结构设计规范》(GBJ10—89)有关规定进行。由于每环的张拉端即为相邻环的中间截面,故损失值取两者的平均值,即 $\sigma_{s1} = (\sigma_{L1} + \sigma_{L2})/2$ ,

$$\sigma_{s1} = \sigma_{L4} + \sigma_{L5} \quad \sigma_s = \sigma_{s1} + \sigma_{s1} \quad (\text{N/mm}^2);$$

$\sigma_k$ —非预应力钢筋在抗裂验算边缘的抗拉应力, $\sigma_k = \frac{A_s f_y}{A_n} \quad (\text{N/mm}^2);$

其中: $A_0$ —构件换算截面面积,

$$A_0 = A_n + \frac{E_s}{E_c} A_p \quad (\text{mm}^2)$$

$A_n$ —构件净截面面积,

$$A_n = A - n \frac{\pi d^2}{4} \quad (\text{mm}^2);$$

$E_c$ 、 $E_s$ —分别为非预应力筋和预应力筋的弹性模量(N/mm<sup>2</sup>);

$n$ 、 $d$ —分别为预应力筋的根数和直径。

### 三、预应力筒仓设计算例

#### 第1步:技术准备

1. 掌握工艺提供资料,了解工艺流程,确定仓径、仓高、结构布置、贮料物理力学指标、工艺设备配置情况等。

2. 确定预应力工艺及材料,如张拉锚固设备选型,预应力筋选用等。

3. 具体设计计算。为便于说明问题,假定工程实例如下:煤仓, $d_n = 30\text{m}$ , $H_n = 40\text{m}$ ,原煤 $\nu = 10\text{kN/m}^3$ ,贮料水平压力 $P_n$ : $S = 40\text{m}$ , $P_h = 162\text{kN/m}^2$ , $S = 30\text{m}$ , $P_h = 121\text{kN/m}^2$ , $S = 20\text{m}$ , $P_h = 81\text{kN/m}^2$ , $S = 10\text{m}$ , $P_h = 40\text{kN/m}^2$ 。采用C30混凝土,非应力筋为Ⅰ级钢,预应力钢丝束采用无粘结筋束 $>\Phi 5$ ,标准强度 $f_{pk} = 1470\text{N/mm}^2$ ,抗拉设计强度 $f_{py} = 1000\text{N/mm}^2$ ,弹性模量 $E_s = 1.8 \times 10^5\text{N/mm}^2$ ;张拉锚具采用XM15—4群锚体系,每环预应力筋采用3根包角 $120^\circ$ , $7\Phi 5$ 为1根,用4根无粘结筋组成1束,锚于沿仓壁等距布置的6根柱上,两端同时张拉。仓壁厚度 $t = d_n/100 + 50 = 350\text{mm}$ 。

试算仓壁配筋及抗裂验算。

#### 第2步:仓壁内力分析

$$S_{10} \quad P_h = 40\text{kN/m}^2 \quad N = RPv_Q = 15 \times 40 \times 1.3 = 780\text{kN/m}$$

$$S_{20} \quad P_h = 81\text{kN/m}^2 \quad N = 1579\text{kN/m}$$

$$S_{30} \quad P_h = 121\text{kN/m}^2 \quad N = 2359\text{kN/m}$$

$$S_{40} \quad P_h = 162\text{kN/m}^2 \quad N = 3159\text{kN/m}$$

第3步:计算 $A_s$ 及 $A_p$

1. 计算 $A_s$ (以下仅计算 $S_{40}$ 截面,其它见汇总表)

$$\eta_s = \frac{f_y}{f_{py}} = \frac{310}{1000} = 0.31$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } A_s &= \frac{N\eta_s}{f_y} \\ &= \frac{3159 \times 10^3 \times 0.31}{310} \\ &= 3159\text{mm}^2 \end{aligned}$$

选用 $16\phi 16$   $A_s = 3216\text{mm}^2$

$$\rho_s = \frac{3216}{350 \times 10^3} = 0.0092 = 0.92\%$$

2. 计算 $A_p$

$$N_2 = N - N_1 = N(1 - \eta_s) = 3159 \times 10^3 (1 - 0.31) = 2179.7 \times 10^3 \quad (\text{N/m})$$

$$\begin{aligned} \text{所以 } A_p &= \frac{N(1 - \eta_s)}{f_{py}} = \frac{2179.7 \times 10^3}{1000} \\ &= 2179.7\text{mm}^2 \end{aligned}$$

$7\Phi 5$  钢丝束  $A_{p1} = 138\text{mm}^2$

每 $m$ 仓高截面上的钢丝束根数 $n$

$$n = \frac{A_p}{A_{p1}} = \frac{2179.7}{138} = 16 \text{ 根}$$

实际 $A_p = n \cdot A_{p1} = 16 \times 138 = 2208\text{mm}^2$

$$\text{每4根为一束,所以 } @ = \frac{1000}{4} = 250\text{mm}^2$$

$$\rho_p = \frac{A_p}{A} = \frac{2208}{350 \times 10^3} = 0.0063 = 0.63\%$$

$$\begin{aligned} \text{总的配筋率 } \rho &= \rho_s + \rho_p = 0.92 + 0.63 \\ &= 1.55\% \end{aligned}$$

第4步:构件截面特征计算

$$A = t \times 10^3 = 350 \times 10^3 = 350000\text{mm}^2$$

$$\begin{aligned} A_h &= A - n \frac{\pi d^2}{4} = 350000 - 16 \frac{\pi 15^2}{4} \\ &= 347172.6\text{mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_0 = A_n + \frac{E_s}{E_c} A_p$$

$$= 347172.6 + \frac{1.8 \times 10^5}{3 \times 10^4} \times 2208$$

$$= 360420\text{mm}^2$$

第5步:张拉控制应力计算

$$\sigma_{con} = 0.7 f_{pk} = 0.7 \times 1470 = 1029\text{N/mm}^2$$

第6步:预应力损失计算。此项计算比较细致且复杂,相当重要。因它涉及的影响因素较多,一些数据须由实验研究确定,特别是对筒仓结构而言。应力损失值的大小,按结构特点、施工工艺等力求做到计算准确,但比较困难。一般设计计算,通过实际施工测试验证。然后再对设计结果进行修正较为合适。

1. 第1批损失:包括锚具变形和钢筋内缩引起的 $\sigma_{L1}$ 及钢筋与孔道壁之间的摩擦引起的 $\sigma_{L2}$ 。

后张无粘结混凝土筒仓预应力曲线钢筋的 $\sigma_{L1}$ 计算,因预应力钢筋对应的圆心角大于 $30^\circ$ ,此时求得反摩擦影响度 $L_1 < X$ , $\sigma_{L1}$ 为负值,因此 $\sigma_{L1}$ 值可近似地采用预应力直线钢筋的公式。

$$\begin{aligned}\text{即 } \sigma_{L1} &= \alpha E_s / L \\ &= 5 \times 1.8 \times 10^5 / 16032 \\ &= 56 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

张拉端至锚固端的距离 $L$ ,因两端同时张拉,故取 $L$ =张拉钢筋长度之半,即:

$$L = \frac{\pi D}{3 \times 2} = 16032 \text{ mm}.$$

$$\begin{aligned}\sigma_{L2} \text{ 的计算, } K &= 0.0035 \quad \mu = 0.1 \\ X &= 16.032 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\theta = \frac{X}{Y_c} = \frac{16.032}{15.30} = 1.048.$$

因 $KX + \mu\theta = 0.0035 \times 16.032 + 0.1 \times 1.048 = 0.161 < 0.2$

所以 $\sigma_{L2}$ 计算采用《混凝土设计规范》中(3.4.10-2)式,即:

$$\begin{aligned}\sigma_{L2} &= (KX + \mu\theta) \sigma_{con} = 0.161 \times 1029 \\ &= 166 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}Q_{s1} &= (\sigma_{L1} + \sigma_{L2}) / 2 = (56 + 166) / 2 \\ &= 111 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

2. 第2批损失:包括预应力钢筋的应力松弛 $\sigma_{L4}$ 及混凝土收缩、徐变等引起的钢筋应力损失 $\sigma_{L5}$ 。按照规范规定:

$$\begin{aligned}\sigma_{L4} &= 4 \left( 0.36 \frac{\sigma_{con}}{f_{ptk}} - 0.18 \right) \sigma_{con} \\ &= 1.0 \left( 0.36 \frac{0.7 f_{ptk}}{f_{ptk}} - 0.18 \right) \sigma_{con} \\ &= 0.072 \sigma_{con} = 0.072 \times 1029 \\ &= 74 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\sigma_{L5} = \beta \left[ \frac{25 + 220 \frac{\sigma_{pc}}{f_{cu}}}{1 + 15\rho} \right]$$

$$\begin{aligned}\sigma_{pc} &= \frac{A_p (\sigma_{con} - \sigma_{s1})}{A_n} \\ &= \frac{2208 (1029 - 111)}{347172.6} \\ &= 5.84 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$f_{cu} = f_{cu} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$\beta = 1.2$  (考虑筒仓多处于干燥环境)

$$\begin{aligned}\sigma_{L5} &= 1.2 \left[ \frac{25 + 220 \frac{5.84}{30}}{1 + 15 \times 0.0155} \right] \\ &= 1.2 \left( \frac{25 + 42.82}{1 + 0.2325} \right) = 66.0 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\sigma_{s1} = \sigma_{L4} + \sigma_{L5} = 74 + 66 = 140 \text{ N/mm}^2$$

$$\begin{aligned}\text{总的应力损失 } \sigma_s &= \sigma_{s1} + \sigma_{s1} = 111 + 140 \\ &= 251 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

$$\text{损失率} = \frac{251}{1029} = 24.39\%$$

第7步:构件截面应力分析

1. 相应阶段预应力钢筋的有效预应力

$$\sigma_{pe} = \sigma_{con} - \sigma_s = 1029 - 251 = 778 \text{ N/mm}^2$$

2. 相应阶段作用于构件截面上的有效压应力 $\sigma_c$

$$\sigma_c = \frac{\sigma_{pe} A_p}{A_0} = \frac{778 \times 2208}{369420} = 4.77 \text{ N/mm}^2$$

3. 非预应力钢筋承担的拉应力 $\sigma_g$

$$\sigma_g = \frac{A_s f_t}{A_n} = \frac{310 \times 3159}{347172.6} = 2.82 \text{ N/mm}^2$$

4. 在贮料压力作用下仓壁内产生拉应力,考虑荷载短期效应组合

$$\begin{aligned}\sigma_{cs} &= \frac{N_s}{A_n} = \frac{N/v_Q}{A_n} = \frac{3159 \times 10^3}{347172.6} \\ &= 7.0 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

5. 仓壁截面上的存在拉应力 $\sigma$

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_{cs} - \sigma_c - \sigma_g \\ &= 7.0 - 4.77 - 2.82 = -0.59 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

第8步:抗裂验算

允许存在的拉应力 $0.5 f_{ptk} = 0.5 \times 2.0 = 1.0 \text{ N/mm}^2$

实际存在的拉应力 $\sigma = -0.59 \text{ N/mm}^2$  (即压应力)

$\sigma < 0.5 f_{ptk}$  满足要求。

$S = 30 \text{ m}, 20 \text{ m}, 10 \text{ m}$  各截面计算结果列入表1。

另外,为进一步掌握预应力筒仓全面情况,对直径21m、40m、50m的各规格仓型进行一系列计算,技术条件基本同30m仓壁,结果列入表2、3、

4.

#### 四、体会与看法

按照本文所述设计计算方法,通过对 21~50m 仓径系列的配筋和抗裂验算,归纳起来有以下几点体会和看法,供参考。

1. 建造大型或特大型圆筒仓,采用无粘结预应力混凝土结构是适宜的。它不仅能满足受力的强度和抗裂要求,而且比较经济。如仍采用普通混凝土建造,则是很困难,甚至是不可能的。

2. 预应力筒仓正截面受拉承载力计算,非预应力筋和预应力筋的分担比例问题,本文提出按两种钢筋的设计抗拉应力值之比,即  $\eta_s = f_s / f_{py}$  进行分配,通过一系列的计算,对强度和抗裂可同时满足。一般结果,构件截面上都或多或少存在有压应力(详见各例题)。考虑筒仓贮料的特点,满仓、空仓、半满仓等情况的交替存在,仓壁中抗拉应力不总是满负荷的,而且按规定截面中也允许存在一些拉应力,即小于  $0.5f_{pk} = 1.0\text{N/mm}^2$ ,因此,非预应力筋的配筋率尚可减少些,  $f_s / f_{py} = 0.31$ ,取 0.3。将非预应力筋与预应力筋的配筋比例调整为 0.3:0.7。以适当减少仓壁截面中的压应力。

3. 仓壁截面厚度  $t$  值的确定问题,对大型预应力筒仓按  $t = d_n / 100 + 50\text{mm}$  的公式计算比较符合截面的强度和抗裂验算,配筋率也适中。从大量的计算结果中尚可看出,如将厚度再减少 50mm,配筋量不变的情况下,对强度和抗裂要求仍可满足。考虑筒仓的工况条件比较复杂,物料和大气对其影响,因而,仍维持  $t = d_n / 100 + 50$  的公式计算结果,比较适合。

4. 预应力损失值问题,筒仓的预应力损失计算中涉及一些参数取值问题,例如,张拉端至计算截面的孔道长度,反摩擦影响长度,预应力圆弧筋对应的圆心角大于  $30^\circ$  时如何计算等,确实需要进一步共同研究解决。但通过一系列的计算结果,如图 1 所示的预应力总损失率统计情况表明,仓径不大于 40m 的,基本上符合随仓径不断加大,损失率则逐渐减少的规律,唯 50m 仓则突然增加,究其原因,可能是混凝土强度等级在 50m 仓中,因环拉力突然加大,受拉区预应力钢筋在各自合力点处混凝土法向压应力增加,而此时仍采用

C30 强度等级的砼显得有些不足,将 C30 改 C40 情况就会好。

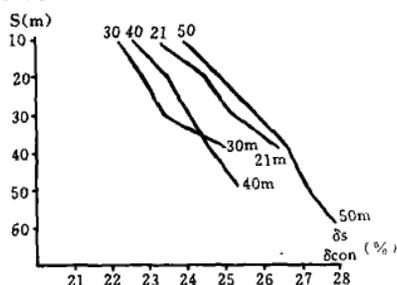


图 1 预应力损失率曲线

5. 预应力筒仓的混凝土强度等级采用问题。目前有的主张采用不低于 C40, 也有的主张不要任意提高,宜采用 C30 的,对于这个问题,笔者认为应本着科学的,实事求是的态度,从结构计算需要和施工方便程度等实际情况出发,合理确定其混凝土强度等级。根据以上系列配筋计算,初步认为:仓径 40m 及以下的筒仓,可采用 C30 混凝土;仓径 50m 及以上的筒仓,应采用较大一级的即不低于 C40 混凝土。

6. 关于预应力筒仓的配筋问题,一般应按计算进行。为使大家对筒仓的配筋能有一个大概的了解,现根据一系列计算结果统计绘入图 3 中,图 3 是按图 2 中的荷载及环拉力计算的。

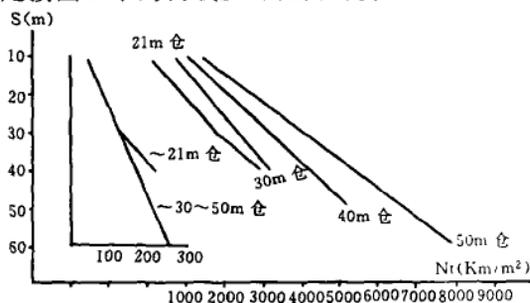


图 2 荷载及环拉力

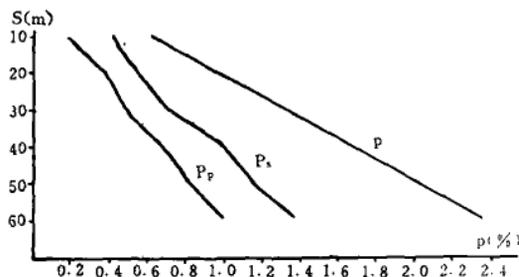


图 3 预应力筒仓平均配筋率曲线

注:图中的配筋是按贮料重力密度  $\nu = 10\text{kN/m}^3$  计算的,当  $\nu$  大于或小于  $10\text{kN/m}^3$  应乘以  $\nu / 10$  予以调整  $\nu$  为实际的重力密度。

非应力筋和应力筋的配置情况,即直径和根数大致如表5所示。

由表1可以看出,非预应力钢筋根数不多,直径也不算大,在《筒仓设计规范》允许的范围以内,没有超筋布置现象。预应力筋的布置密度,除50m直径的特大型仓外,一般都能满足设计有关方面的要求。

21~50m 预应力筒仓钢筋配置情况表 表5

S(m)	非预应力钢筋	预应力钢筋
10	10Φ12~10Φ14	4~8 7Φ5
20	10Φ12~18Φ14	6~13 7Φ5
30	14Φ12~20Φ16	8~20 7Φ5
40	14Φ16~20Φ18	14~26 7Φ5
50	~20Φ20	26~33 7Φ5
60	~24Φ20	~40 7Φ5

7. 关于预应力筋的张拉控制应力  $\sigma_{con}$  的取值问题。按《混凝土设计规范》规定,后张法的钢绞线、碳素钢丝取  $\sigma_{con} = 0.70f_{pk}$ , 预应力筒仓的无粘结筋原则上应执行此项规定。但有的设计取  $0.75f_{pk}$ , 其理由是增加张拉力对抗裂有好处,充分发挥材力可节约钢材。但通过对一系列筒仓的计算,认为按  $0.7f_{pk}$  取值较为合适。因为张拉力虽提高了5个百分点,其中损失30%左右,结果只

剩下3.5左右的百分点。此时唯能减少的是非预应力筋,但我们想针对筒仓受力特点(主要是贮料压力和温度应力等)有意识提高一些非应力筋配筋率,这样或许对筒仓正常使用状态带来好处。目前张拉控制应力  $\sigma_{con}$  取  $0.7f_{pk}$ , 非应力筋与应力筋之配置比在  $1.3 \sim 1.4:1$ 。从实际计算结果看,是比较合适的。但是有些问题,仍需通过试验研究进一步取得资料,使设计计算更加合理完善。

8. 本文的目的不是研讨预应力筒仓的有关设计技术问题,提到一些也是粗浅的。主要是想通过预应力筒仓设计的假设例子,领会新《砼设计规范》(GBJ10-89)在筒仓设计中的具体应用问题,促使预应力筒仓更加普及推广和规范的贯彻实施。

#### 参考文献

- [1]《混凝土结构设计规范》GBJ10-89
- [2]陶学康等,后张无粘结预应力筋在砼圆形煤仓设计中应用。《特种结构》1991.1期
- [3]ACI 313委员会报告,后张法预应力筒仓,煤炭工业部规划设计院1982.4
- [4]《钢筋砼筒仓设计规范》GBJ77-85

30m 直径预应力筒仓配筋及抗裂计算

表1

截面		S(m)		40		30		20		10		
荷载		$P_h$ (kN/m <sup>2</sup> )		162		121		81		40		
		$N_t$ (kN/m)		3159		2359		1579		780		
壁厚		$t$ (mm)		350		300		350		300		
配筋	应力筋	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )		3159		3159		2359		2359		
		$n\Phi$		16Φ16		16Φ16		12Φ16		12Φ16		
		$\rho_s$ (%)		0.92		1.053		0.689		0.804		
	总率	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )		2180		2180		1628		1628		
		$n$		16 7Φ5		16 7Φ5		12 7Φ5		12 7Φ5		
		$\rho_s$ (%)		0.63		0.736		0.473		0.519		
截面特征		$A$ (mm <sup>2</sup> )		350000		300000		350000		300000		
		$A_n$ (mm <sup>2</sup> )		347173		297173		347880		297880		
		$A_0$ (mm <sup>2</sup> )		360420		310420		357816		307816		
应力损失	第一批	$\sigma_{L1}$ (N/mm <sup>2</sup> )		56		56.4		56		56.4		
		$\sigma_{L2}$ (N/mm <sup>2</sup> )		166		166		166		166		
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )		111		111.2		111		111.2		
	第二批	$\sigma_{L4}$ (N/mm <sup>2</sup> )		74		74		74		74		
		$\sigma_{L5}$ (N/mm <sup>2</sup> )		62.7		73.2		57.2		62.5		
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )		136.7		147.2		131.2		136.5		
总失		$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )		24.07		25.09		23.53		24.05		
截面分析	$\sigma_{sc}$ (N/mm <sup>2</sup> )		7		9.16		5.22		5.9		4.53	
	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )		4.08		5.48		3.64		4.21		2.47	
	$\sigma_k$ (N/mm <sup>2</sup> )		2.82		3.35		2.15		2.51		1.37	
	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )		0.10		0.33		-0.57		-0.83		-0.69	
抗裂		$\sigma < 0.5f_{tk}$ (✓)		✓		✓		✓		✓		

21m 直径预应力筒仓配筋及抗裂计算

表 2

截面	S(m)		40		30		20		10	
	荷载	$P_h$ (kN/m <sup>2</sup> )		211		121		81		40
	$N_i$ (kN/m)		2880		1651		1105		546	
壁厚	$r$ (mm)		250	200	250	200	250	200	250	200
配筋	应力筋	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	2880	2880	1651	1651	1105	1105	546	546
		$n\Phi$	14Φ16	14Φ16	14Φ12	14Φ12	10Φ12	10Φ12	10Φ12	8Φ12
		$\rho_s$ (%)	1.125	1.406	0.613	0.791	0.452	0.565	0.4	0.4
	力筋	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	1987	1987	1139	1139	780	780	352	352
		$n$	14 7Φ5	14 7Φ5	8 7Φ5	8 7Φ5	6 7Φ5	6 7Φ5	4 7Φ4	4 7Φ4
		$\rho_s$ (%)	0.773	0.961	0.442	0.552	0.311	0.414	0.14	0.189
总率	$\rho_p$ (%)	1.898	2.369	1.055	1.343	0.783	0.979	0.54	0.589	
截面特征	$A$ (mm <sup>2</sup> )	250000	200000	250000	200000	250000	200000	250000	200000	
	$A_n$ (mm <sup>2</sup> )	247526	197526	248586	198586	248940	198940	249548	199548	
	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	259118	209118	255210	205210	252708	202708	250956	200956	
应力损失	第一批	$\sigma_{L1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	53.4	53.8	53.4	53.8	53.4	53.8	53.4	53.8
		$\sigma_{L2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	200	200	200	200	200	200	200	200
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	126.7	126.9	126.7	126.9	126.7	126.9	126.7	126.9
	第二批	$\sigma_{L4}$ (N/mm <sup>2</sup> )	74	74	74	74	74	74	74	74
		$\sigma_{L5}$ (N/mm <sup>2</sup> )	71.3	80.5	57.7	61.7	50.5	55.0	37.8	41.4
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	145.3	154.5	131.7	135.7	124.5	129	111.8	115.4
	总失	$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	26.43	27.35	25.11	25.52	24.41	24.87	23.18	23.54
截面应力分析	$\sigma_{sc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	8.95	11.22	5.10	6.40	3.41	4.27	1.68	2.11	
	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	5.64	7.10	3.40	4.13	2.55	3.16	1.11	1.48	
	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	3.52	4.41	1.97	2.47	1.37	1.76	1.41	1.24	
	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	-0.21	-0.29	-0.27	-0.21	-0.51	-0.65	-0.84	-0.62	
抗裂	$\sigma < 0.5f_{tk}$ (✓)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

40m 直径预应力筒仓配筋及抗裂计算

表 3

截面	S(m)		50		40		30		20		10	
	荷载	$P_h$ (kN/m <sup>2</sup> )		202		162		121		81		40
	$N_i$ (kN/m)		5252		4212		3146		2106		1040	
壁厚	$r$ (mm)		450	500	450	400	450	400	350	300	350	300
配筋	应力筋	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	5252	5252	4212	4212	3146	3146	2106	2106	1040	1040
		$n\Phi$	16Φ20	16Φ20	16Φ18	16Φ18	16Φ16	16Φ16	14Φ14	14Φ14	14Φ12	12Φ12
		$\rho_s$ (%)	1.12	1.26	0.905	1.02	0.715	0.804	0.615	0.718	0.40	0.4
	力筋	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	3264	3264	2906	2906	2171	2171	1453	1453	718	718
		$n$	26 7Φ5	26 7Φ5	20 7Φ5	20 7Φ5	16 7Φ5	16 7Φ5	10 7Φ4	10 7Φ4	6 7Φ5	6 7Φ5
		$\rho_s$ (%)	0.797	0.797	0.613	0.69	0.491	0.552	0.394	0.46	0.18	0.276
总率	$\rho_p$ (%)	1.917	2.157	1.518	1.71	1.206	1.356	1.01	1.178	0.629	0.676	
截面特征	$A$ (mm <sup>2</sup> )	450000	400000	450000	400000	450000	400000	350000	300000	350000	300000	
	$A_n$ (mm <sup>2</sup> )	445405	395405	446466	396466	447173	397173	348233	298233	348940	298940	
	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	466933	416933	463026	413026	460421	410421	356513	306513	353908	303908	
应力损失	第一批	$\sigma_{L1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	42.1	42.2	42.1	42.2	42.1	42.2	42.1	42.2	42.1	42.2
		$\sigma_{L2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	185.2	185.1	185.2	185.1	185.2	188.1	185.2	185.1	185.2	185.1
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	113.7	113.7	113.7	113.7	113.7	113.7	113.7	113.7	113.7	113.7
	第二批	$\sigma_{L4}$ (N/mm <sup>2</sup> )	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
		$\sigma_{L5}$ (N/mm <sup>2</sup> )	73.7	77.9	65.0	68.5	59.1	62	53.8	57.2	44.9	47.5
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	148.0	151.9	139	142.5	131.1	136	127.8	131.2	118.9	121.5
	总失	$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	25.4	25.81	24.56	24.9	23.98	24.27	23.47	25.45	22.6	22.88
截面应力分析	$\sigma_{sc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	9.07	10.22	7.26	8.17	5.41	6.09	4.65	5.43	2.29	2.68	
	$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	5.9	6.57	4.63	5.44	3.75	4.13	3.05	3.45	1.86	2.18	
	$\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	3.5	3.94	2.83	3.18	2.23	2.51	1.92	2.24	1.41	1.25	
	$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )	-0.33	0.29	-0.2	-0.45	-0.57	-0.55	-0.32	-0.26	-0.98	-0.75	
抗裂	$\sigma < 0.5f_{tk}$ (✓)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

50m 直径预应力筒仓配筋及抗裂计算

表 4

截面	S(m)	60	50	40	30	20						
荷载	$P_h$ (kN/m <sup>2</sup> )	243	202	162	121	81						
壁厚	$N_s$ (kN/m)	7898	6565	5265	3932	2632						
配筋	$t$ (mm)	550	500	550	500	400	400	400	400	300		
	应力筋	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	7898	2798	6565	6565	5265	5265	3932	3932	2632	2632
		$n\Phi$	24Φ20	24Φ20	20Φ20	20Φ20	20Φ18	16Φ18	20Φ16	20Φ16	18Φ14	18Φ14
		$\rho_s$ (%)	1.37	1.51	1.143	1.26	1.02	1.27	0.805	1.006	0.694	0.925
	总率	$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	5520	5520	4554	4554	3588	3588	2670	2670	1994	1794
		$n$	40 7Φ5	40 9Φ5	33 7Φ5	33 7Φ5	26 7Φ5	26 7Φ5	20 7Φ5	20 7Φ5	13 7Φ5	13 7Φ5
		$\rho_s$ (%)	1.004	1.104	0.828	0.911	0.718	0.897	0.552	0.69	0.449	0.598
	截面特征	$\rho_p$ (%)	2.374	2.614	1.971	2.17	1.738	2.167	1.357	1.696	1.143	1.548
		$A$ (mm <sup>2</sup> )	550000	500000	550000	500000	550000	400000	500000	400000	400000	300000
		$A_n$ (mm <sup>2</sup> )	542931	492931	544168	494168	595404	395404	496466	396466	397703	297703
应力损失	$A_0$ (mm <sup>2</sup> )	576051	526051	571348	521492	516932	416932	512522	412522	408467	308407	
	第一批	$\sigma_{L1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	33.7	33.8	33.7	33.8	33.7	33.8	33.7	33.8	33.7	33.8
		$\sigma_{L2}$ (N/mm <sup>2</sup> )	227.6	227.5	227.6	227.5	227.6	227.5	227.6	227.5	227.6	227.5
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	130.7	130.7	130.7	130.7	130.7	130.7	130.7	130.7	130.7	130.7
	第二批	$\sigma_{L4}$ (N/mm <sup>2</sup> )	74	74	74	74	74	74	74	74	74	74
		$\sigma_{L5}$ (N/mm <sup>2</sup> )	81.4	85.2	74.2	77.6	69.2	76.8	61.6	67.8	54.03	63.0
		$\sigma_{s1}$ (N/mm <sup>2</sup> )	155.4	159.2	148.2	151.6	143.2	150.8	135.6	141.8	124.4	137.0
	总失	$\sigma_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	27.80	28.16	27.10	27.43	26.62	27.35	25.88	26.48	24.79	26.01
	截面分析	$\sigma_{sc}$ (N/mm <sup>2</sup> )	11.19	12.32	9.28	10.22	8.18	10.24	6.09	7.63	5.09	6.80
		$\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	7.12	7.76	5.98	6.52	5.24	6.51	4.11	5.06	3.40	4.43
$\sigma_g$ (N/mm <sup>2</sup> )		3.11	3.95	2.83	3.94	2.27	3.99	1.72	3.15	1.4	2.89	
$\sigma$ (N/mm <sup>2</sup> )		0.96	0.61	0.47	-0.24	0.67	-0.26	0.26	-0.58	0.29	-0.51	
抗裂	$\sigma < 0.5f_{tk}$ (√)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	

## HVM 信息

## 柳州海威姆建筑机械有限公司喜讯不断

近两年来,柳州海威姆建筑机械有限公司在技术上求创新,在管理上求效率,在产品上创精品,在服务上创满意,成绩斐然,喜讯不断。

喜讯一:公司技术开发获得突破性进展,一批项目开发成功并投放市场,其中有的项目填补了国内空白或达到国内领先、国际先进水平,如2000级预应力钢绞线锚固体系锚具、真空辅助灌浆工艺等。两年来公司共申报了29项国家专利,其中有24项已获授权,使公司申报专利总数达到了112项,已获授权专利总数达90项。由于成绩突出,公司被国家知识产权局和国家经贸委确定为“专利工作试点企业”。

喜讯二:2001年7、8月,公司分别通过了中国进出口商检认证中心(CQC)和英国标准学会(BSI)的ISO9001—2000质量管理体系的换证审核。

喜讯三:2000年,公司被中国质量管理协会建设机械行业分会授予“用户满意先进企业”、“质量效益型先进企业”称号,2001年又被该协会授予“用户满意产品”和“售后服务满意单位”等证书。

喜讯四:2000年,HVM产品获建设部中国建设标准化协会授予“工程建设推荐产品”证书,2001年又获中国质量检验协会授予“国家权威检测达标产品”证书。

如今,柳州海威姆建筑机械有限公司已步入良性发展轨道,不断向“高技术、高品质、高效能及优质服务”的目标迈进。“HVM”品牌已获得广大用户的信赖,HVM产品在国内、外工程建设市场中大显身手,如上海磁悬浮铁路、重庆大佛寺大桥、日本川原桥、越南法来桥、新加坡石龙岗桥等。

(玉进勇)